

Unterstützung bei der konstruktionsbegleitenden Simulation von Flanschverbindungen

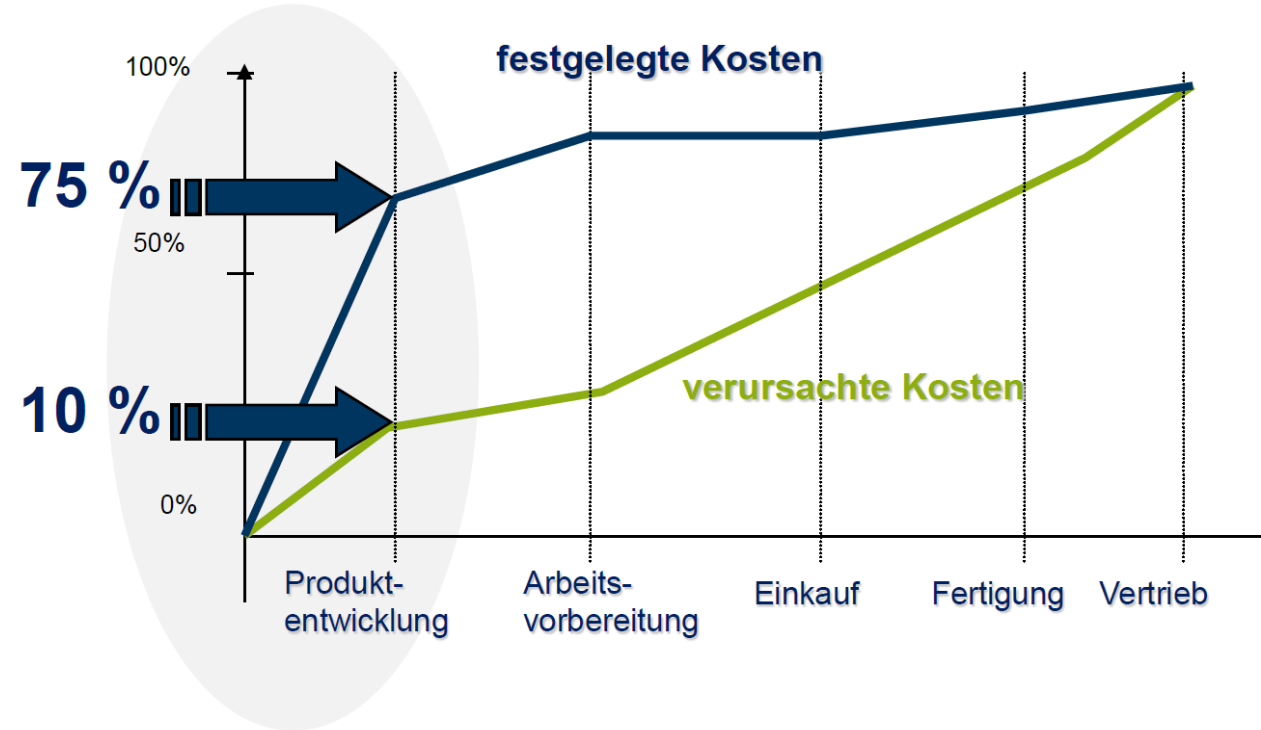
Loibl, André M. Sc.; Andrae, René M. Sc.

Rechnereinsatz in der Konstruktion
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

- Einleitung
- Ansätze für eine wissensbasierte Unterstützung bei der Simulation
- Anwendung der Ansätze auf ein Beispiel
- Zusammenfassung
- Ausblick

Einleitung





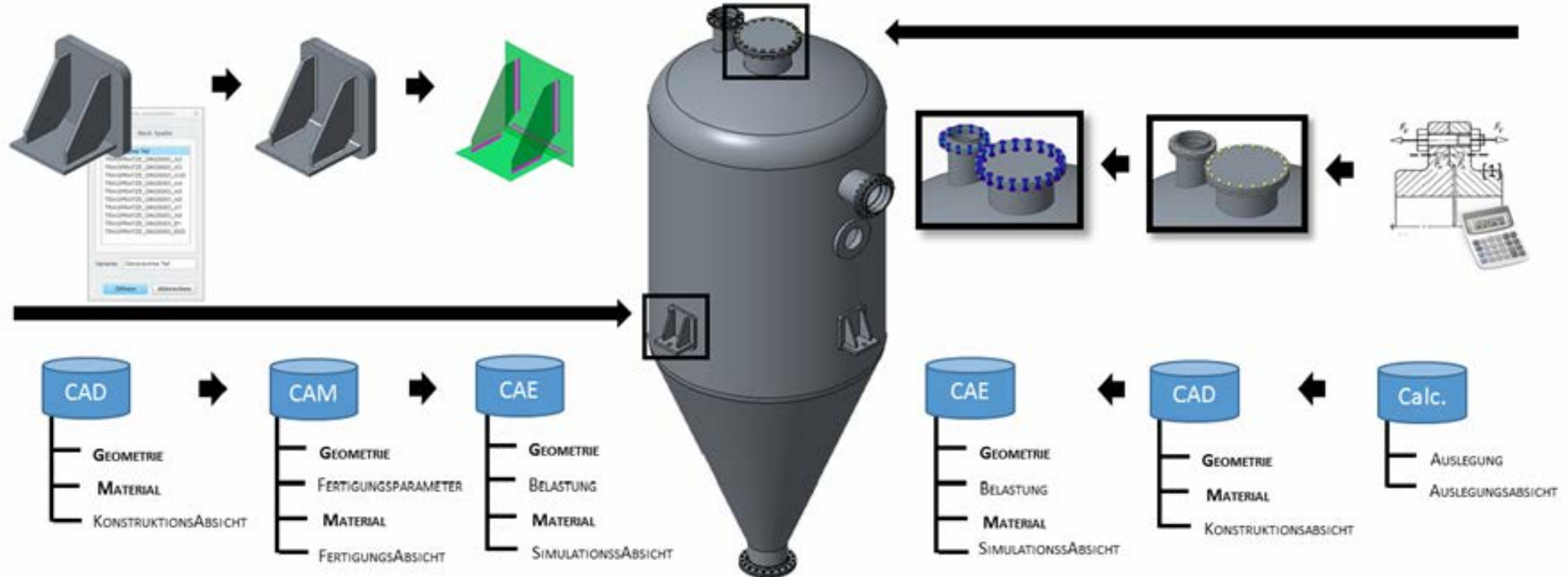
1. Etwa 75% der Herstellungskosten werden in der Produktentwicklung festgelegt
2. Fehler in der späteren Phasen verursachen enorme Kosten
3. Die Entscheidungsfreiheit nimmt in den späteren Phasen ab

Quelle: M. Abramovici (Ruhr-Uni Bochum)

Konzept

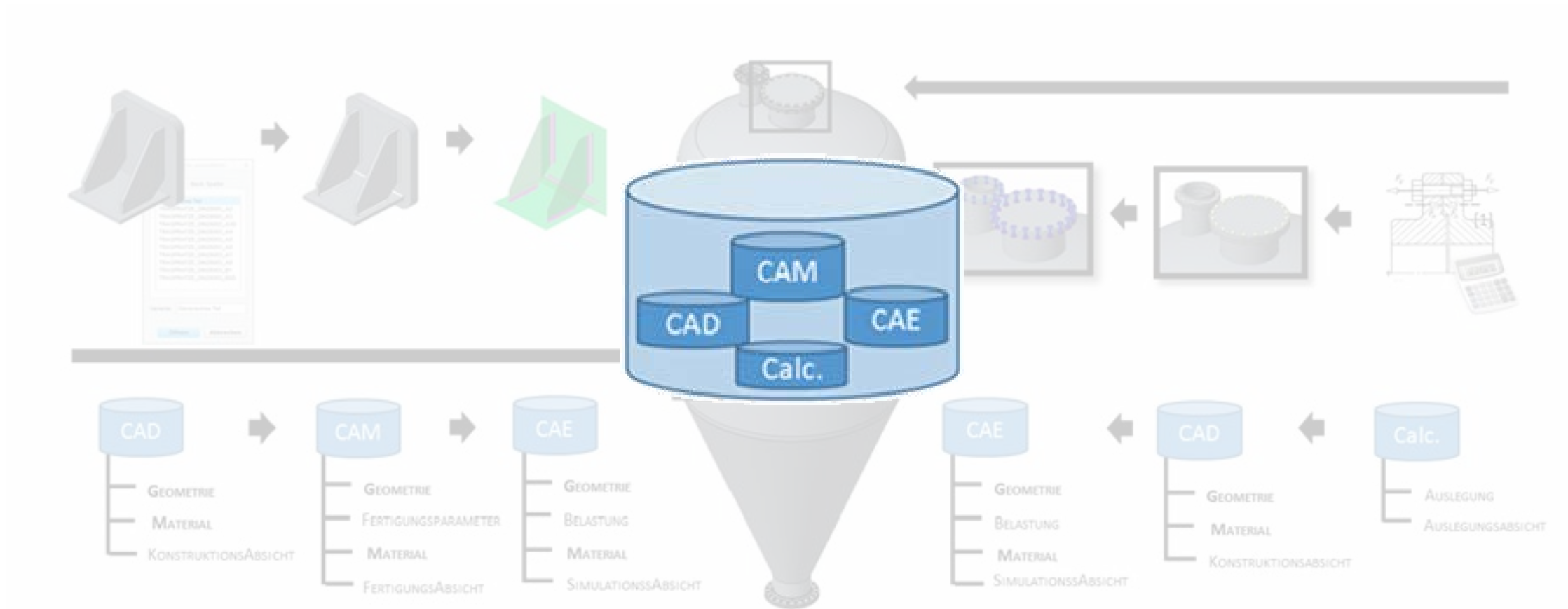
- Durchgehende Arbeitsumgebung
- Bidirektional verknüpfte Partialmodelle (CAD/CAM/CAE/CALC)

- Unterstützung und Entlastung des Konstrukteurs durch moderne Techniken
- Erhöhen der Produktqualität durch regelbasierte Arbeitsweise



Ziel

- Durchgehende Arbeitsweise
- Redundante und zu jederzeit identische Partialmodelle (CAD/CAM/CAE/CALC)
- Unterstützung und Entlastung des Konstrukteurs durch moderne Techniken
- Erhöhen der Produktqualität durch Konzentration auf die eigentlichen Aufgaben



Grundlagen



Flanschverbindungen



[buerkert.de, 20.04.2017]

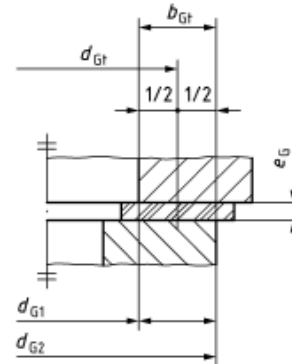
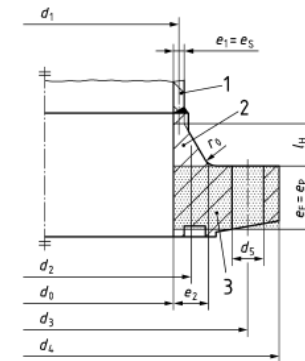


[chemiehoch3.de, 20.04.2017]

- Lösbare Verbindung im Rohrleitungsbau
- Kann bei allen Drücken und Temperaturen eingesetzt werden
- Wird eingesetzt wenn die Trennmöglichkeit einer Rohrleitung erforderlich ist und sich Schweißverbindungen nicht eignen

Auslegung einer Flanschverbindung

- Erfolgt nach der DIN EN 1591 – 1
 - Berechnungsvorschriften hinsichtlich Dichtigkeit und Festigkeit
 - Gleichmäßige Verteilung von vier oder mehr Schrauben über Flansch
 - Querschnitt des Flansches
 - Dichtungsquerschnitt
- Auslegung erfolgt für Montagezustand und Betriebszustand
 - Dichtigkeit
 - Kein Verlust des Kontaktes zwischen Flansch und Schraube
 - Ausreichende Belastung der Dichtung



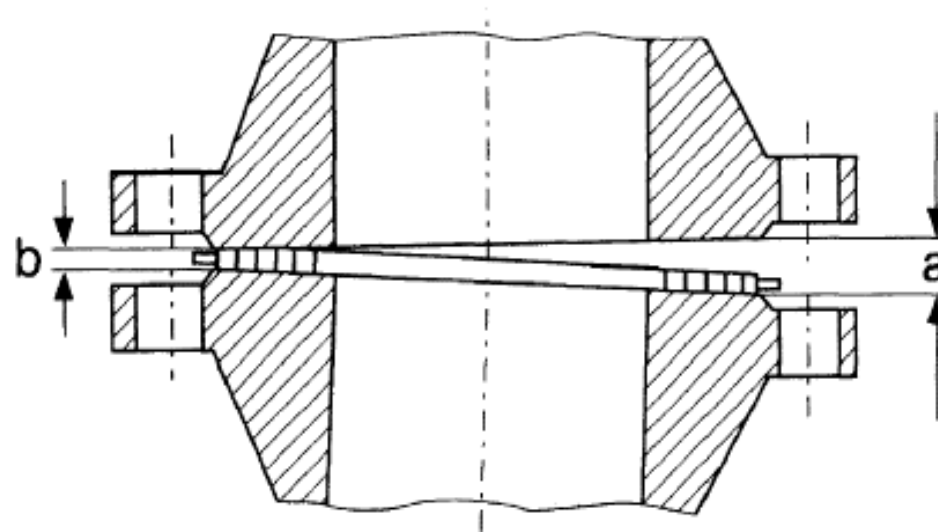
Quelle: DIN EN 1591 - 1

- Kräfte an einer Flanschverbindung:
 - Mediendruck innen oder außen
 - Äußere Belastungen: Axial- und Querkräfte, Torsions- und Biegemomente
 - Axiale Ausdehnung von Flanschen, Schrauben und Dichtungen, durch Temperatureinwirkungen
- Sonstige Kräfte
 - Rohrleitungskräfte und Lastfallbedingungen aus Softwarelösungen für Rohrstatik wie Rohr2

→ Es liegen **asymmetrische Belastungen** an einer Flanschverbindungen vor

Flanschmontage in der Praxis

Leitfaden des Verbandes der chemischen Industrie e.V. (VCI)



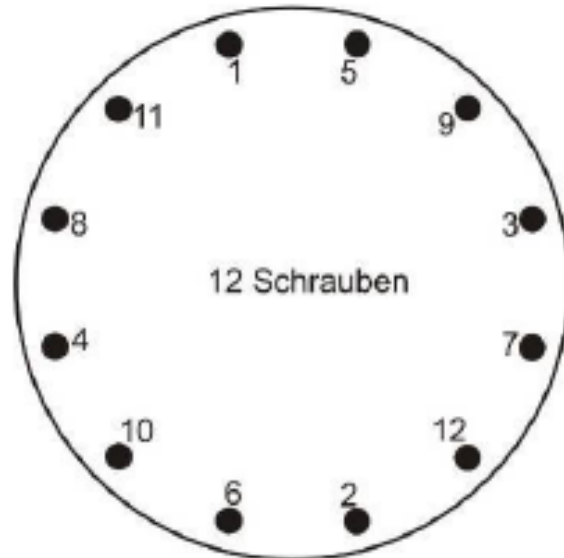
[Leitfaden zur Montage von Flanschverbindungen, VCI, 2016]

Voraussetzungen zur Montage:

- Rohrleitungen sind drucklos und es herrscht Umgebungstemperatur
- Klaffung $a - b$ liegt unter 1 Millimeter
- Es wurde eine Sichtprüfung aller Bauteile durchgeführt

Flanschmontage in der Praxis

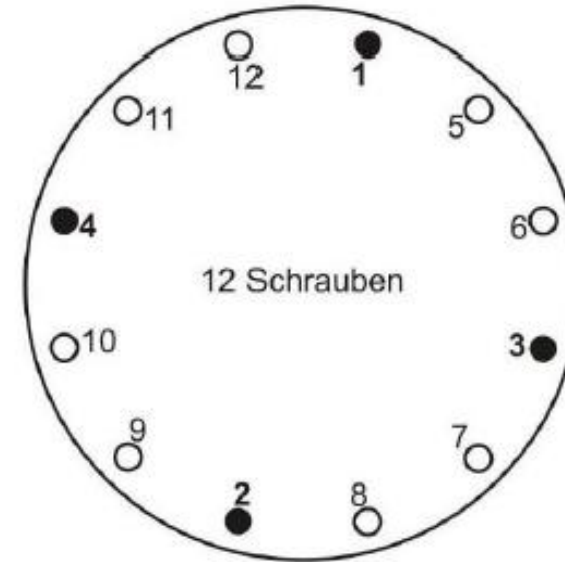
Anzugsverfahren 1



[Leitfaden zur Montage von Flanschverbindungen, VCI, 2016]

- Kreuzweise zuerst 30% des Sollmomentes, gefolgt von 60% und 100%
- Wiederholen von 100%

Anzugsverfahren 2

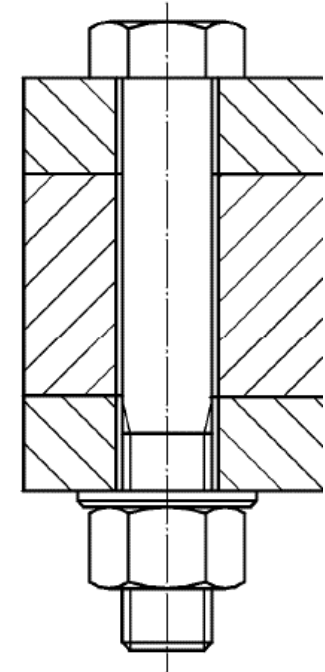


[Leitfaden zur Montage von Flanschverbindungen, VCI, 2016]

- 4 Schrauben mit 20% des Sollmomentes, gefolgt von 60% und 105%
- Restliche Schrauben mit 105%

Analytische Schraubenberechnung

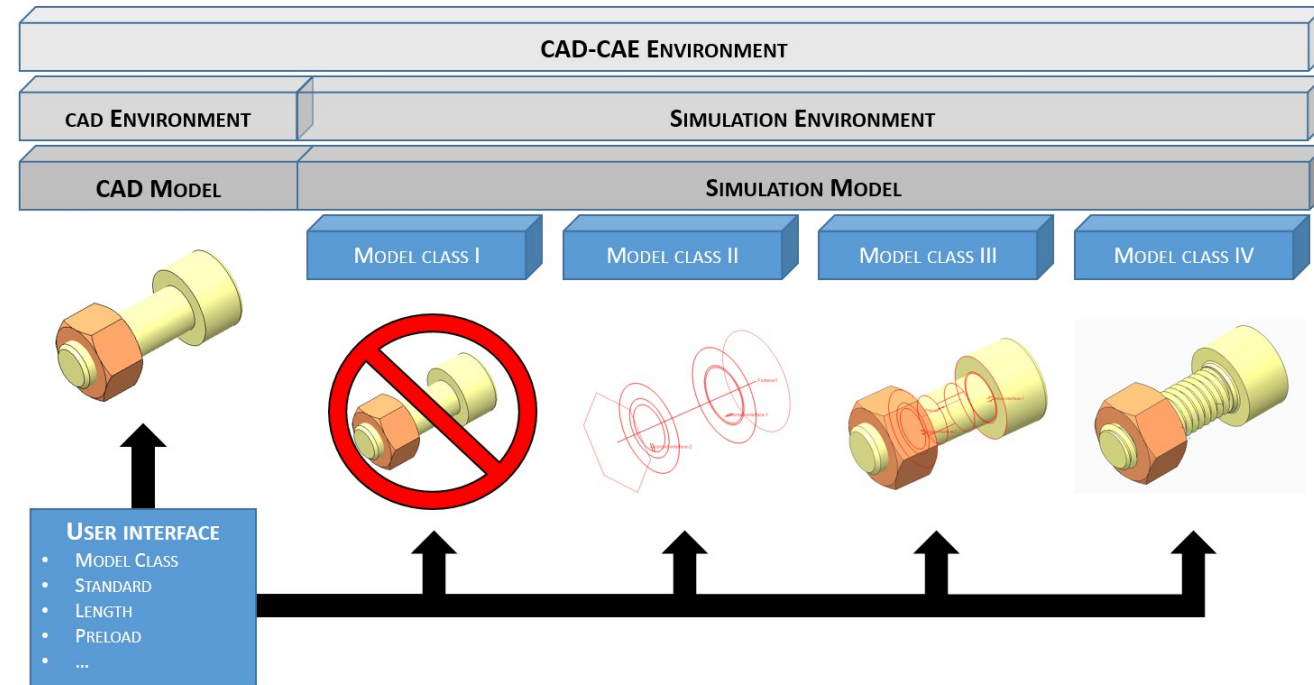
- Typische Schraubenverbindung
 - Schraube
 - Mutter
 - Unterlegscheibe
 - Verspannte Bauteile
- Auftretende Effekte
 - Vorspannkraftverlust durch Setzen, Ausdehnen bzw. Schrumpfen der Bauteile
- Auslegung erfolgt nach der VDI Richtlinie 2230 Blatt 1
 - Nenndurchmesser, Mindestklemmkraft, Mindestmontagevorspannkraft
 - Festigkeit des Werkstoffs für Montagevorspannkraft
 - Betrachtung der Flächenpressung unter dem Schraubenkopf



Quelle: J. Feldhusen

Analytische Schraubenberechnung

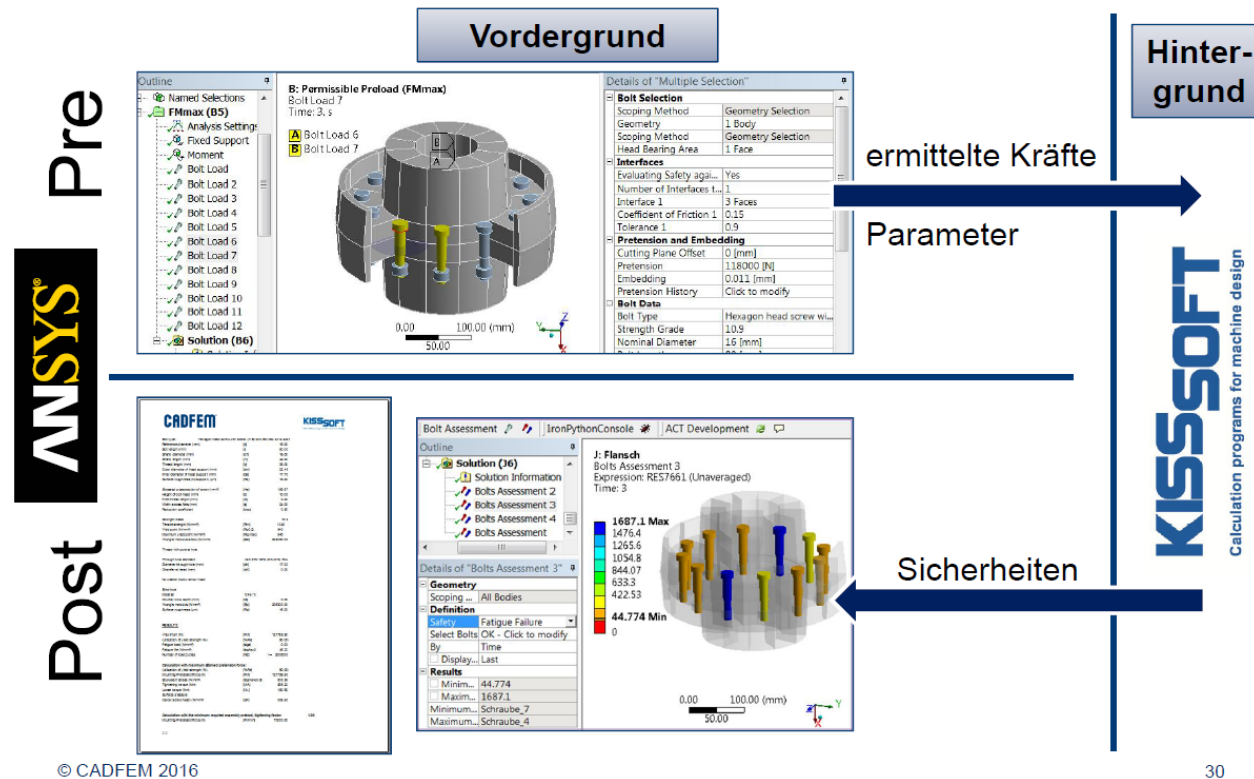
- VDI Richtlinie 2230 Blatt 2
- Vier Modellklassen:
 - Betrachtung von Schnittlasten
 - Darstellung als Linienelement
 - Volumenkörper
 - Detaillierte Nachbildung der Schraube



“flangeValid“

- Dienstleistungen zur Überprüfung von Flanschverbindungen auf maximale Schraubenauslastung

Bolt Assessment inside ANSYS – Schraubenbewertung nach VDI 2230

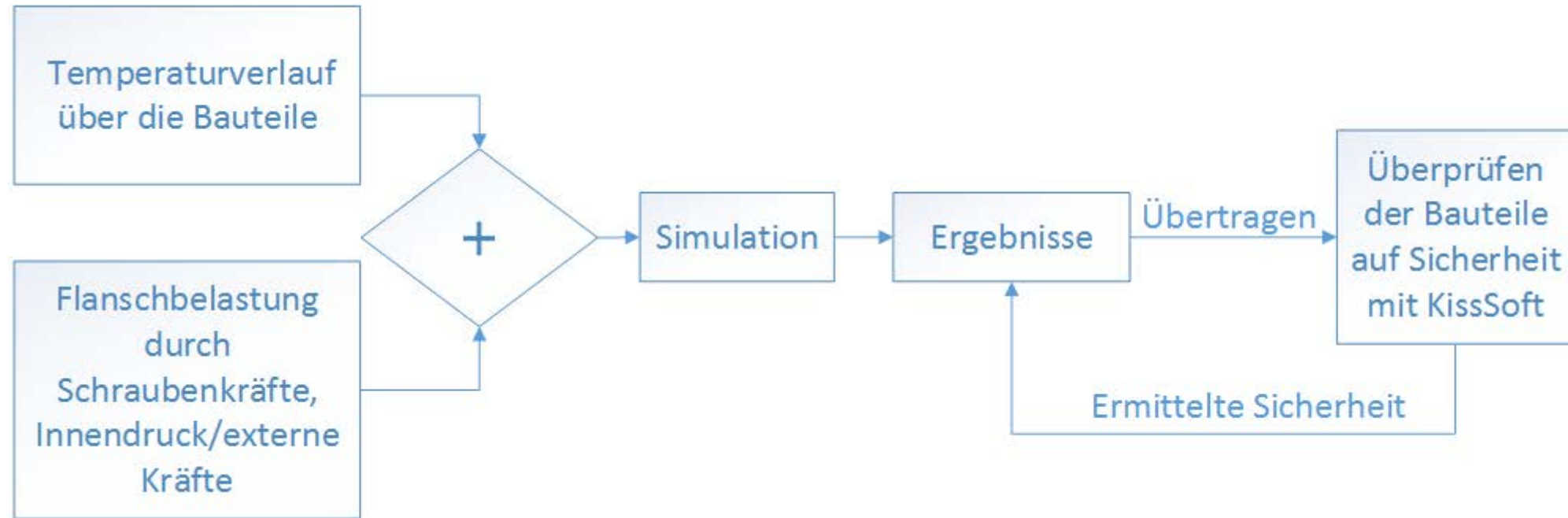


© CADFEM 2016

30

Quelle: CADFEM(2016)

Optimierungsprozess nach “flangeValid“

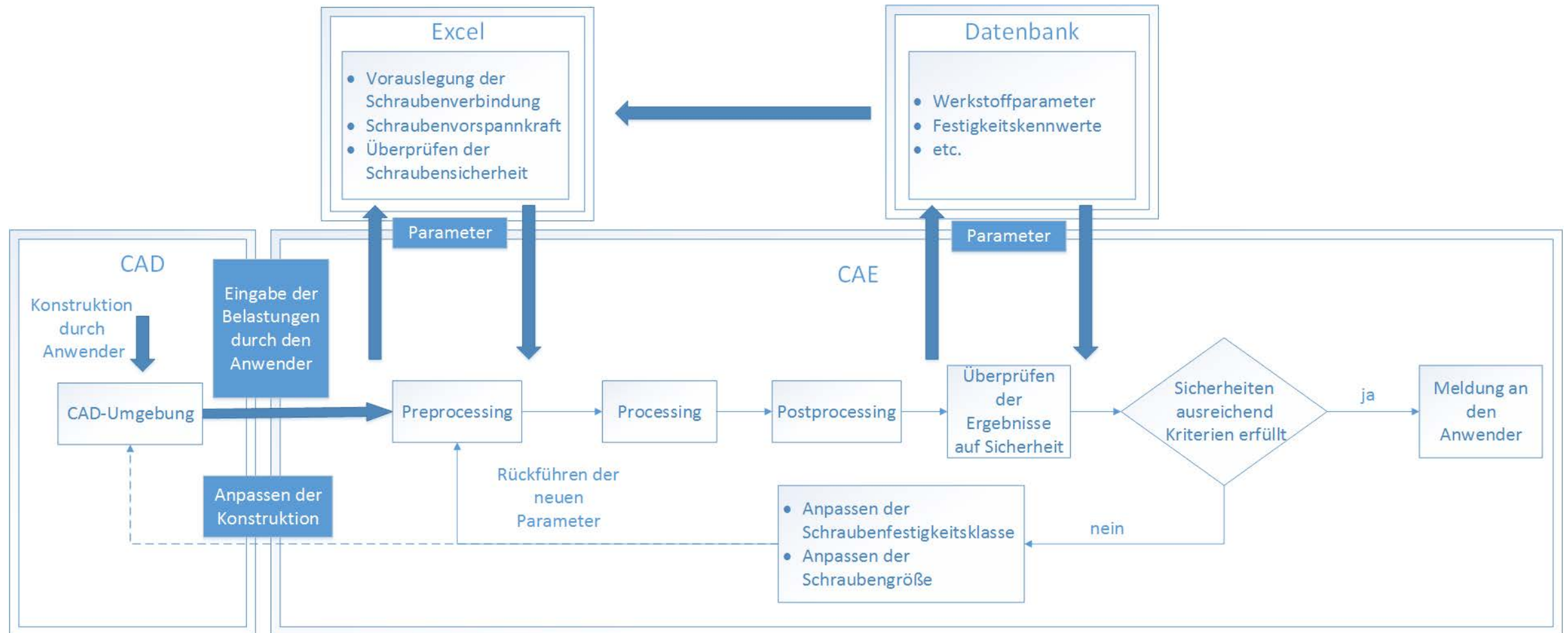


Ansätze für eine wissenschaftsbasierte Unterstützung bei der Simulation



Ansatz für wissensbasierte Schraubenauslegung

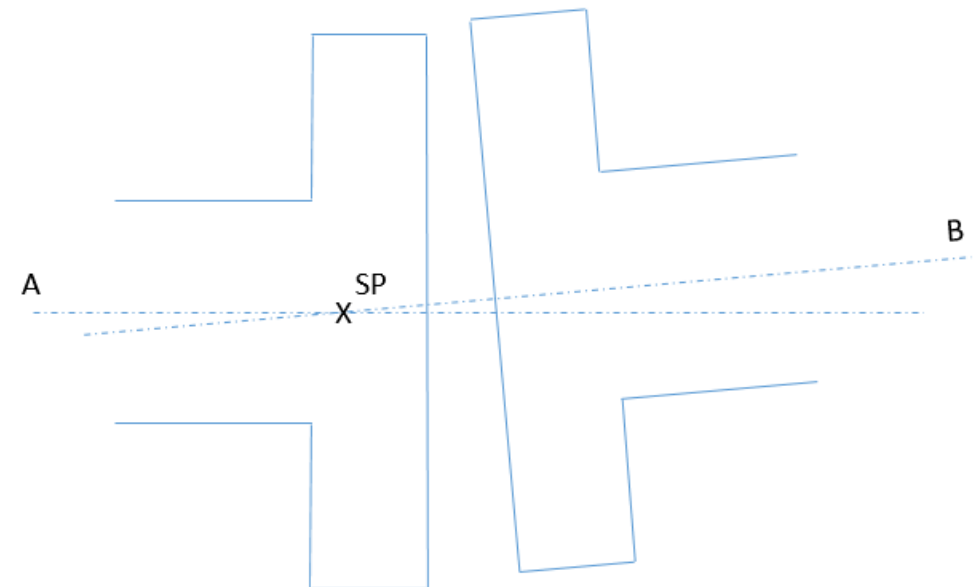
Konzept für eine optimierte Auslegung einer Schraubenverbindung



Ansatz über die Ausrichtung der Flanschachsen

Mögliche Ausgangssituationen durch Belastung und für welche Fälle ist ein Optimierungsbedarf gegeben:

- Kein Optimierungsbedarf
 - Identische Flanschachsen
- Mögliche Optimierung
 - Parallele Flanschachsen
- Notwendige Optimierung
 - Achsen besitzen einen gemeinsamen Schnittpunkt
 - Achsen sind windschief



- Mögliche Parameter zur Anpassung einer Flanschverbindung:

Fest	Veränderlich
Nenndruckstufe	Material der Dichtung
Nennweite	Flanschtyp
Schraubennenngröße	Schraubenvorspannkräfte
Dichtfläche	Schraubenfestigkeitsklasse
Anzahl der Schrauben	

- Ziele:
 - Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit



Anwendung auf ein Beispiel



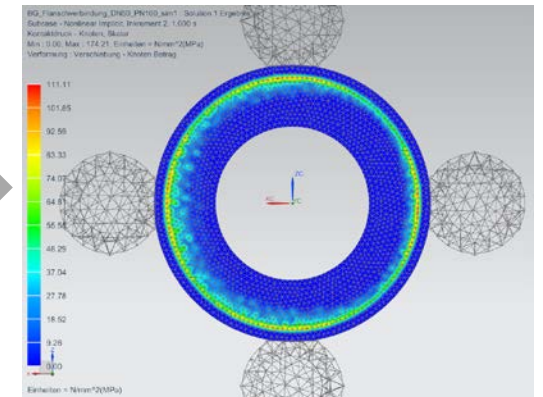
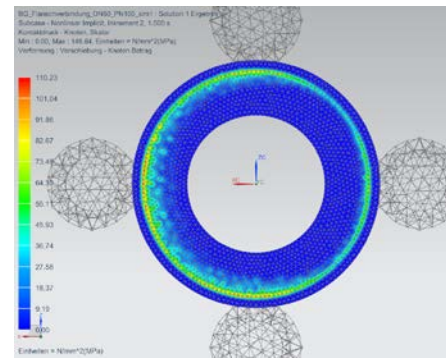
Partialmodelle

Flanschoptimierung

Schraubenauslegung



Flanschauslegung



Partialmodelle

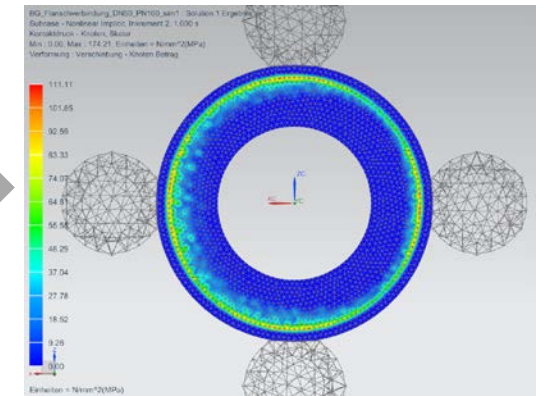
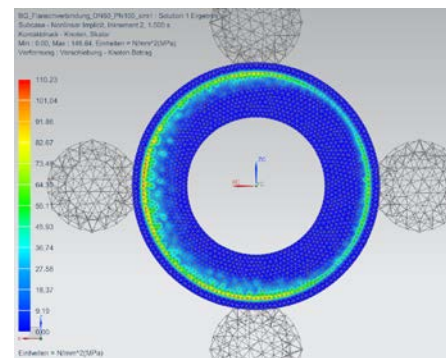
Flanschoptimierung

Schraubenauslegung

- Optimierung der Schraubenverbindung
- Anpassen der Schraubenvorspannkräfte
- Überprüfen der Schraubenfestigkeitsklasse



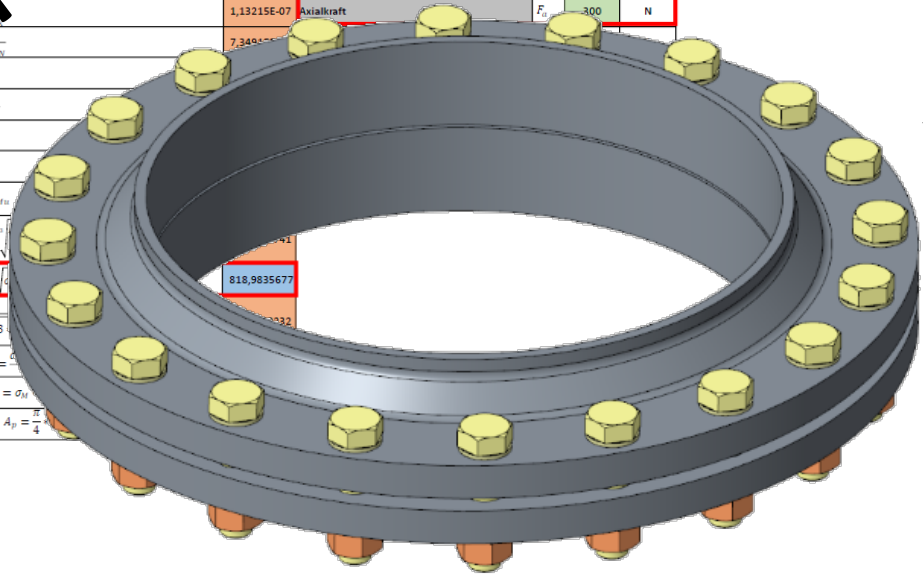
Flanschauslegung



Anwendung des Ansatzes

	Berechnungsformel	Wert	Parameter		Einheit
Nachgiebigkeit der Schraube	$\delta_s = \frac{1}{E_s}(\delta_{k1} + \delta_{k2} + \dots + \delta_{k1} + \delta_{k2} + \delta_{k3})$	-1,864E-11	Flankendurchmesser	d_2	30,727 mm
Nachgiebigkeit der verspannten Teile	$\delta_v = \frac{l_k}{A_{vs} \cdot E_v}$	4,33078E-08	E-Modul Schraube	E_s	210.000 N/mm²
Ersatzquerschnitt	$A_{eq} = \frac{\pi}{4}(d_{w2}^2 + d_{w1}^2) + \frac{\pi}{8}d_w(D_k - d_{w1})[(x+1)^2 - 1]$	1451,405243	Außendurchmesser Kopfauflage	d_w	50 mm
Kraftverhältnis	$\phi = n \cdot \frac{\delta_v}{\delta_s + \delta_v}$	0,500215295	Durchmesser Durchgangsloch	d_h	36 mm
zulässige Schraubenkraft	$F_{Bz} = \phi \cdot F_B \leq 0,1 \cdot R_{p0,2} \cdot A_s$		Außendurchmesser verspannte Teile	D_A	70 mm
Flächenpressung unter Kopf/Mutter	$p = \frac{F_{Bz} \cdot 0,9}{A_{eq}} \leq p_0$	236,493545	E-Modul Mutter	E_p	210.000 N/mm²
Schraubenkraft	$F_k = F_v + n \cdot \phi_k \cdot F_A$	562095,3787	Spannungsquerschnitt Schraubengewinde	A_s	694 mm²
Zugspannung	$\sigma_z = \frac{F_k}{A_s}$	809,925791	Schraubenlänge	l	140 mm
Torsionsspannung	$\tau = \frac{F_v \cdot d_2 \cdot \tan(\varphi + \varphi')}{2 \cdot W_p}$	809,925791	Schraubennennendurchmesser	d	33 mm
Durchmesser Spannungsquerschnitt	$d_s = \sqrt{\frac{A_s \cdot 4}{\pi}}$	29,72588508	Gewindelänge	l_G	78 mm
Polares Widerstandsmoment	$W_p = \frac{\pi \cdot d_s^3}{16}$	5157,441062	Mutterhöhe	l_{Mu}	800 mm
Nachgiebigkeit Schraubenkopf	$\delta_k = \frac{l_k}{E_k \cdot A_k}$	7,34915E-08	Kernquerschnitt	A_k	694 mm²
Nachgiebigkeit Schraubenschaft	$\delta_1 = \frac{l_1}{E_s \cdot A_1}$	7,79455E-07	Krafteinleitungsfaktor	n	0,5
Nachgiebigkeit freies Gewinde	$\delta_{G1} = \frac{l_{G1}}{E_s \cdot A_s}$	-4,954E-06	Schraubenvorspannkraft	F_v	561945,3 N
Nachgiebigkeit Gewindekern	$\delta_{G2} = \frac{l_{G2}}{E_s \cdot A_k}$	1,13215E-07	Axialkraft	F_A	-300 N
Nachgiebigkeit Schrauben- und Muttergewinde	$\delta_{G3} = \frac{l_{G3}}{E_s \cdot A_k}$	7,34915E-08			
Ersatzdehnlänge Schraubenkopf	$l_k = 0,4 \cdot d$				
Nennquerschnittsfläche Schraube	$A_n = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$				
Länge eingeschraubtes Gewinde	$l_0 = 0,5 \cdot d$				
Ersatzlänge	$l_M = 0,4 \cdot d$				
Freie Gewindelänge	$l_{FG} = l_0 - l_{Mu}$				
Vergleichsspannung	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot \tau^2}$	818,9835677			
Montagespannung	$\sigma_M = \sqrt{1 + 3 \cdot \phi^2} \cdot \sigma_z$				
Spannkraft	$F_{Sp} = \sigma_M \cdot A_p$				
	$A_p = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}$				

VDI 2230 PART 1



Screw Simulation

Pre-Processing

Element size

Perform meshing

Assign material

Simulation

Add contact conditions

Add constraint

Force in x-direction

Force in y-direction

Force in z-direction

Moment around y-axis

Path to Excel document

Add loads

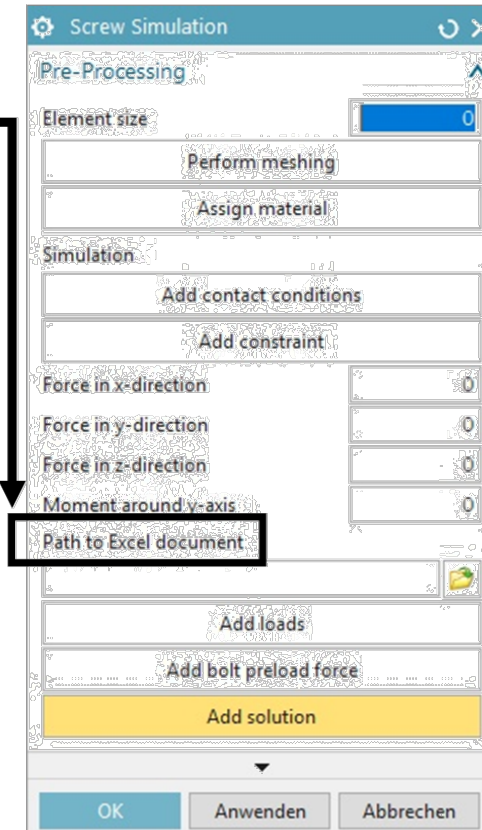
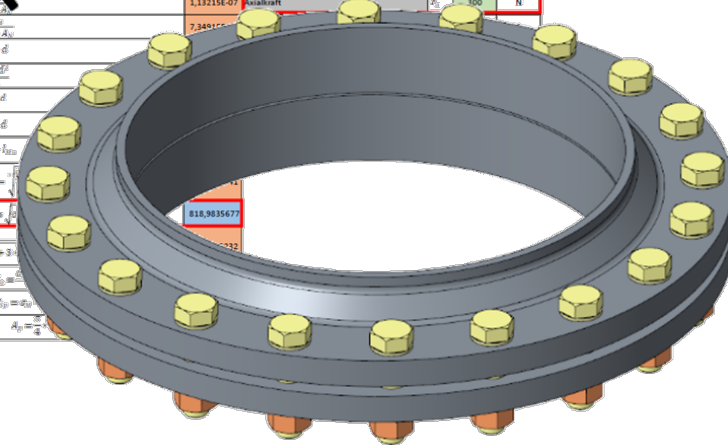
Add bolt preload force

Add solution

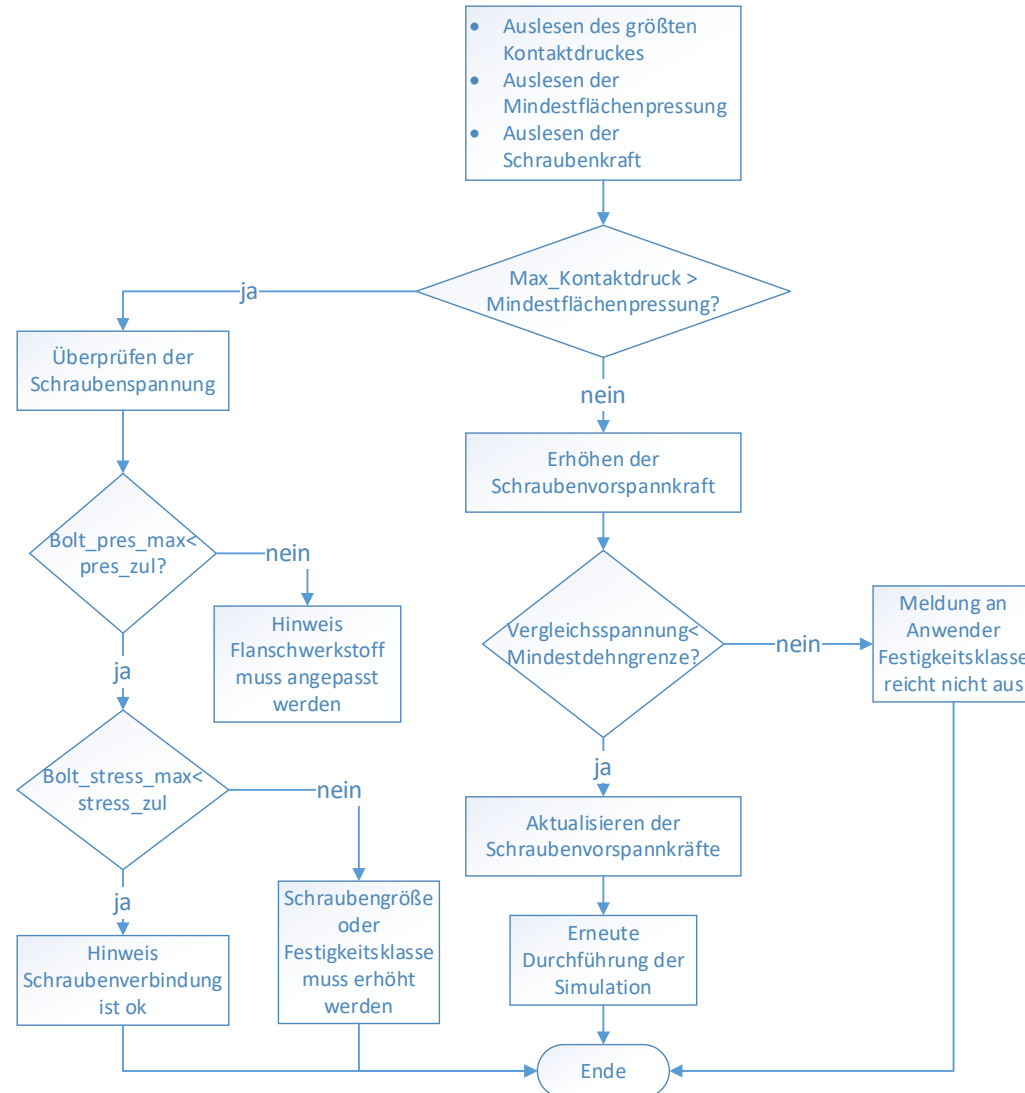
OK
Anwenden
Abbrechen

- Bidirektionale Verbindung zwischen Excel und Siemens NX
- Vorauslegung des Flansches nach DIN EN 1591-1
 - Ableitung einer vorläufigen Schraubenvorspannkraft
- Überprüfung der Ergebnisse mittels Simulation
- Anpassung und Korrektur der Schraubenvorspannkraft und bei Bedarf der Schraubenfestigkeitsklasse

	Berechnungsformel	Wert	Parameter	Einheit
Nachgiebigkeit der Schraube	$\delta_s = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_s} + \frac{F_s \cdot l_s}{E_s \cdot A_s} + \frac{F_s \cdot l_s}{E_s \cdot A_s} + \frac{F_s \cdot l_s}{E_s \cdot A_s} \right)$	-1,664E-11	Flankendurchmesser	d_f 30,327
Nachgiebigkeit der verspannten Teile	$\delta_p = \frac{1}{E_p} \left(\frac{F_p}{A_p} + \frac{F_p \cdot l_p}{E_p \cdot A_p} + \frac{F_p \cdot l_p}{E_p \cdot A_p} + \frac{F_p \cdot l_p}{E_p \cdot A_p} \right)$	4,13078E-08	E-Modul Schraube	E_s 210.000 N/mm²
Ersatzquerschnitt	$A_{eq} = \frac{\pi}{4} \left(d_s^2 + d_p^2 \right) + \frac{\pi}{4} \left(d_s^2 - d_p^2 \right) \left(\frac{l_p}{l_s} + 1 \right)^2$	1451,405243	Außendurchmesser Koprauflage	d_{kop} 90 mm
Kraftverhältnis	$\phi = \frac{F_s}{F_s + F_p} = \frac{A_s}{A_s + A_p}$	0,000215293	Durchmesser Durchgangsloch	d_1 38 mm
zulässige Schraubenkraft	$F_{s, zul} = \phi \cdot F_p \leq \phi \cdot l \cdot R_{p0,02} \cdot A_s$		Außendurchmesser verspannte Teile	D_A 70 mm
Flächenpressung unter Kopf/Mutter	$p = \frac{F_s \cdot l_s}{A_s \cdot l_s} = \frac{F_s}{A_s}$	236,493545	E-Modul Mutter	E_p 210.000 N/mm²
Schraubenkraft	$F_s = F_p + \phi \cdot F_p \cdot \delta_p$	56,2095378	Spannungsquerschnitt Schraubengewinde	A_s 634 mm²
Zugspannung	$\sigma_{Zs} = \frac{F_s}{A_s}$	809,8231	Spannweite	l 140 mm
Torsionspannung	$\tau = \frac{F_s \cdot d_s + F_{axial} \cdot l_p}{2 \cdot A_s \cdot l_s}$		Schraubenmutterdurchmesser	d 38 mm
Durchmesser Spannungsquerschnitt	$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot \sigma_{Zs}}}$	2,77258508	Gewindelänge	l_z 78 mm
Polares Widerstandsmoment	$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$	5157,441062	Muttenhöhe	l_{M0} 800 mm
Nachgiebigkeit Schraubenkopf	$\delta_{sk} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_{sk}} + \frac{F_s \cdot l_{sk}}{E_s \cdot A_{sk}} + \frac{F_s \cdot l_{sk}}{E_s \cdot A_{sk}} + \frac{F_s \cdot l_{sk}}{E_s \cdot A_{sk}} \right)$	7,34915E-08	Kernquerschnitt	A_{KZ} 686 mm²
Nachgiebigkeit Schraubenschaft	$\delta_{sh} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_{sh}} + \frac{F_s \cdot l_{sh}}{E_s \cdot A_{sh}} + \frac{F_s \cdot l_{sh}}{E_s \cdot A_{sh}} + \frac{F_s \cdot l_{sh}}{E_s \cdot A_{sh}} \right)$	7,79455E-07	Krafteinleitungsfaktor	η 0,95
Nachgiebigkeit freies Gewinde	$\delta_{gf} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_{gf}} + \frac{F_s \cdot l_{gf}}{E_s \cdot A_{gf}} + \frac{F_s \cdot l_{gf}}{E_s \cdot A_{gf}} + \frac{F_s \cdot l_{gf}}{E_s \cdot A_{gf}} \right)$	-4,954E-08	Schraubenverspannkraft	F_p 561945,3 N
Nachgiebigkeit Gewindekern	$\delta_{gk} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_{gk}} + \frac{F_s \cdot l_{gk}}{E_s \cdot A_{gk}} + \frac{F_s \cdot l_{gk}}{E_s \cdot A_{gk}} + \frac{F_s \cdot l_{gk}}{E_s \cdot A_{gk}} \right)$	1,13215E-07	Stalkraft	F_s 300 N
Nachgiebigkeit Schrauben- und Muttergewindekern	$\delta_{gsk} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{F_s}{A_{gsk}} + \frac{F_s \cdot l_{gsk}}{E_s \cdot A_{gsk}} + \frac{F_s \cdot l_{gsk}}{E_s \cdot A_{gsk}} + \frac{F_s \cdot l_{gsk}}{E_s \cdot A_{gsk}} \right)$	7,34915E-08		
Ersatzdehnlänge Schraubenkopf	$\delta_{sk} = 0,4 \cdot d$			
Nennquerschnittfläche Schraube	$A_N = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$			
Länge eingeschraubtes Gewinde	$l_{ig} = 0,5 \cdot d$			
Ersatzlänge	$\delta_{st} = 0,4 \cdot d$			
Freie Gewindelänge	$\delta_{st} = l_0 - l_{ig}$			
Vergleichsspannung	$\sigma_{Vs} = \frac{F_s}{A_{Vs}}$	818,983567		
Montagespannung	$\sigma_{Ms} = \frac{F_s}{A_{Ms}}$			
Spannkraft	$F_s = \sigma_{Vs} \cdot A_{Vs}$			



■ Algorithmus zur Optimierung



Partialmodelle

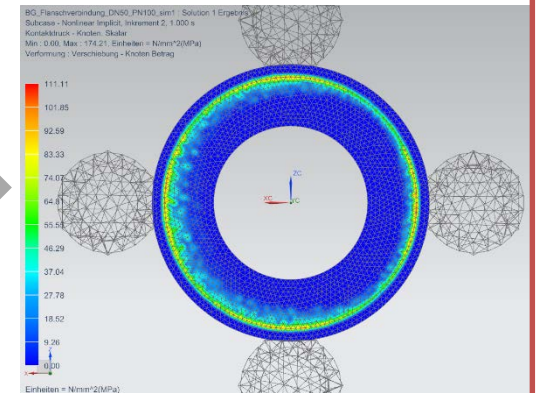
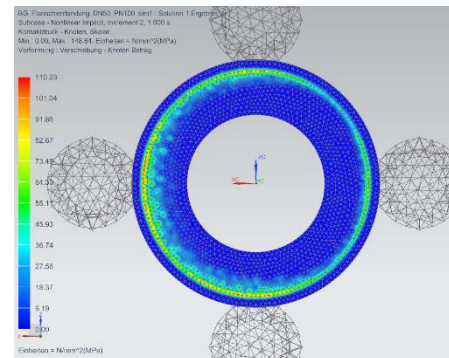
Flanschoptimierung

Schraubenauslegung



Flanschauslegung

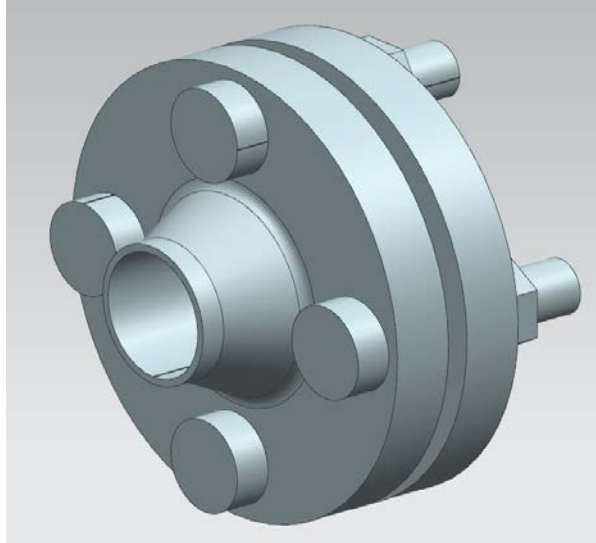
- Optimieren der Flächenpressung
- Anpassen der Schraubenvorspannkräfte



Teil- und Aufgabenbereiche für eine Flanschauslegung

Konstrukteur

- Flansch
 - Typ
 - DN
 - PN
 - Dichtfläche
- Dichtung
- Material



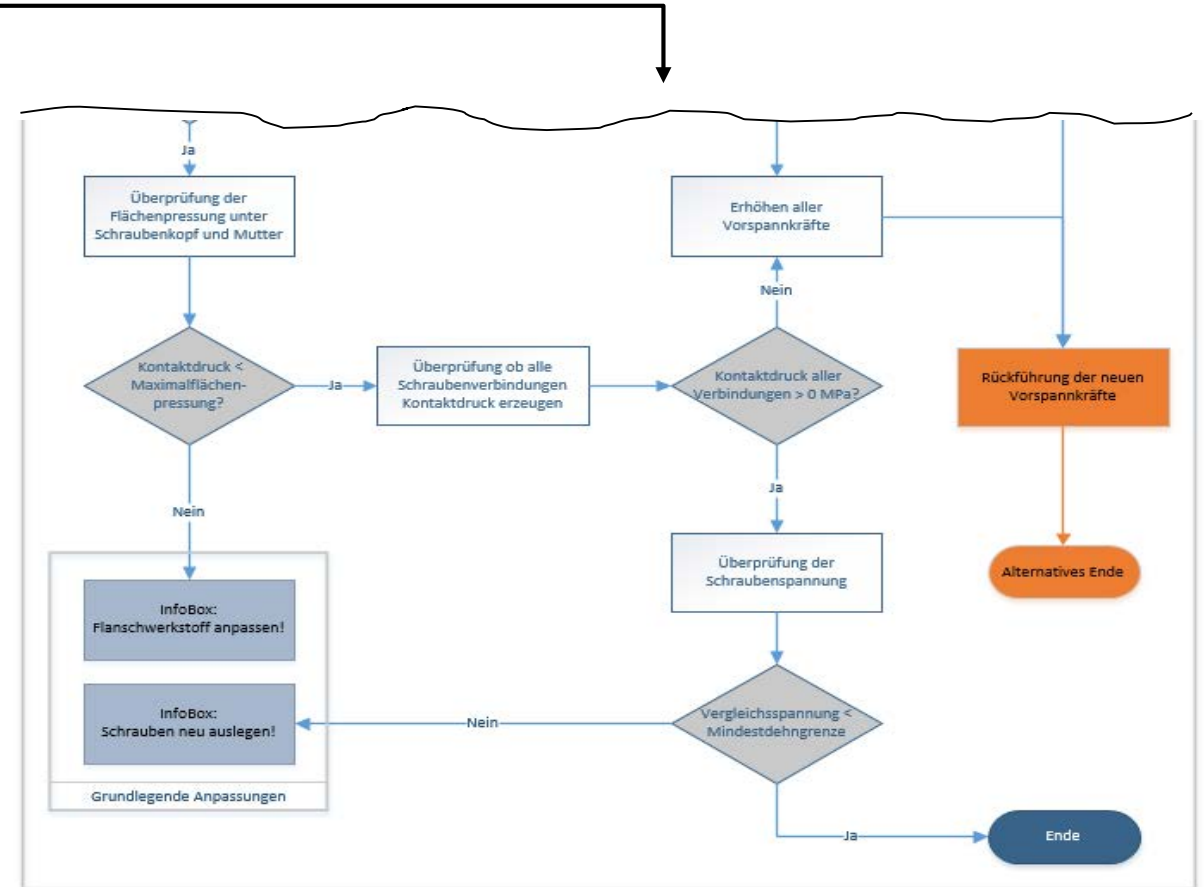
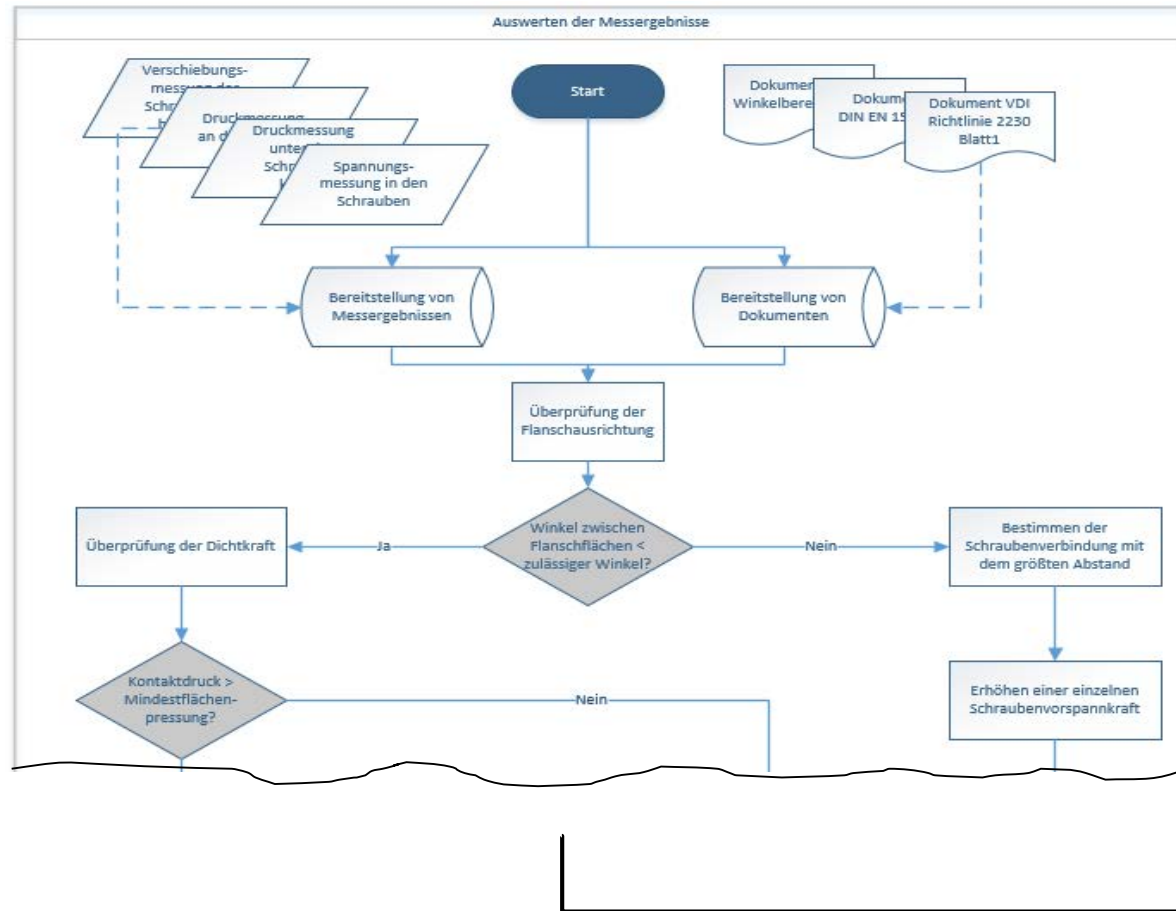
Simulation (Template)

- Vernetzung
- Randbedingungen
- Kontaktbereiche
- Kontaktbedingungen
- Definition Vorspannkräfte
- Definition Lasten

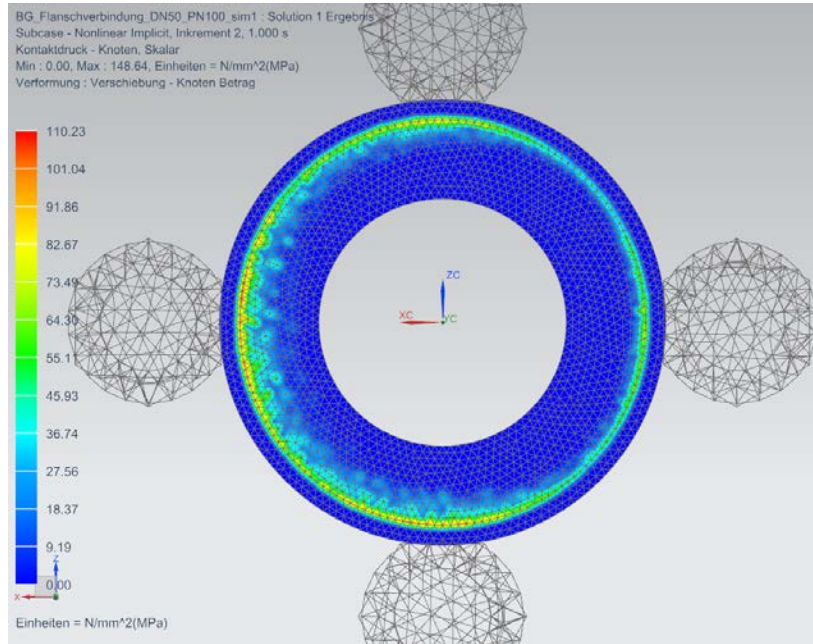
Simulation (Konstrukteur)

- Einstellen der Lasten
- Einstellen der Start-Vorspannkräfte
- Solver-Einstellungen

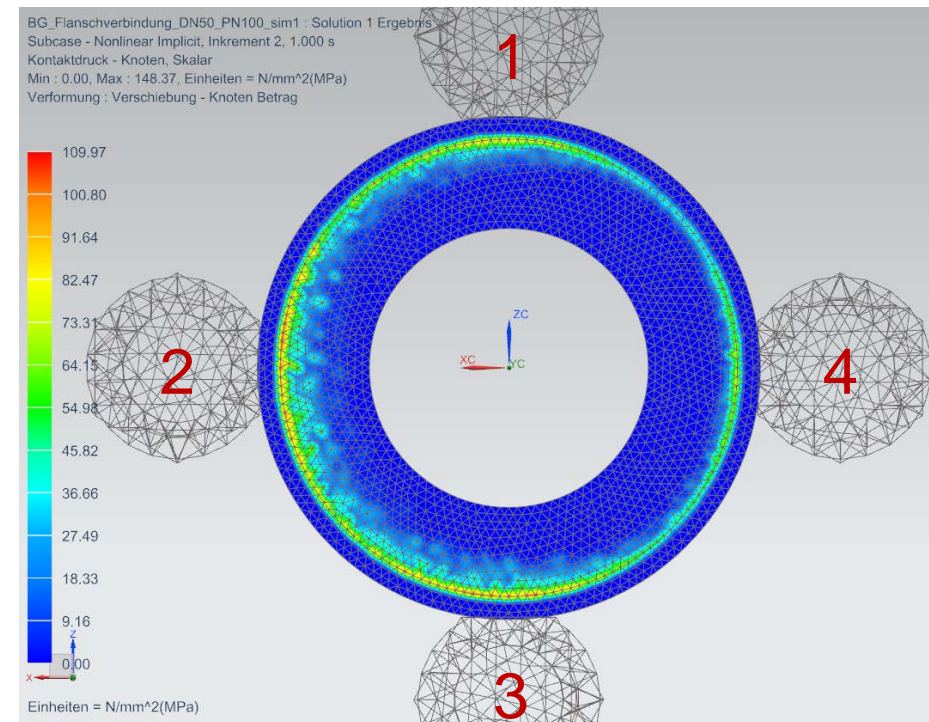
Optimierung durch Abstandsmessungen



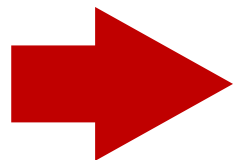
Optimierung durch Abstandsmessungen



	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
Vorspannkraft	21352 N	21000 N	21216 N	21240 N



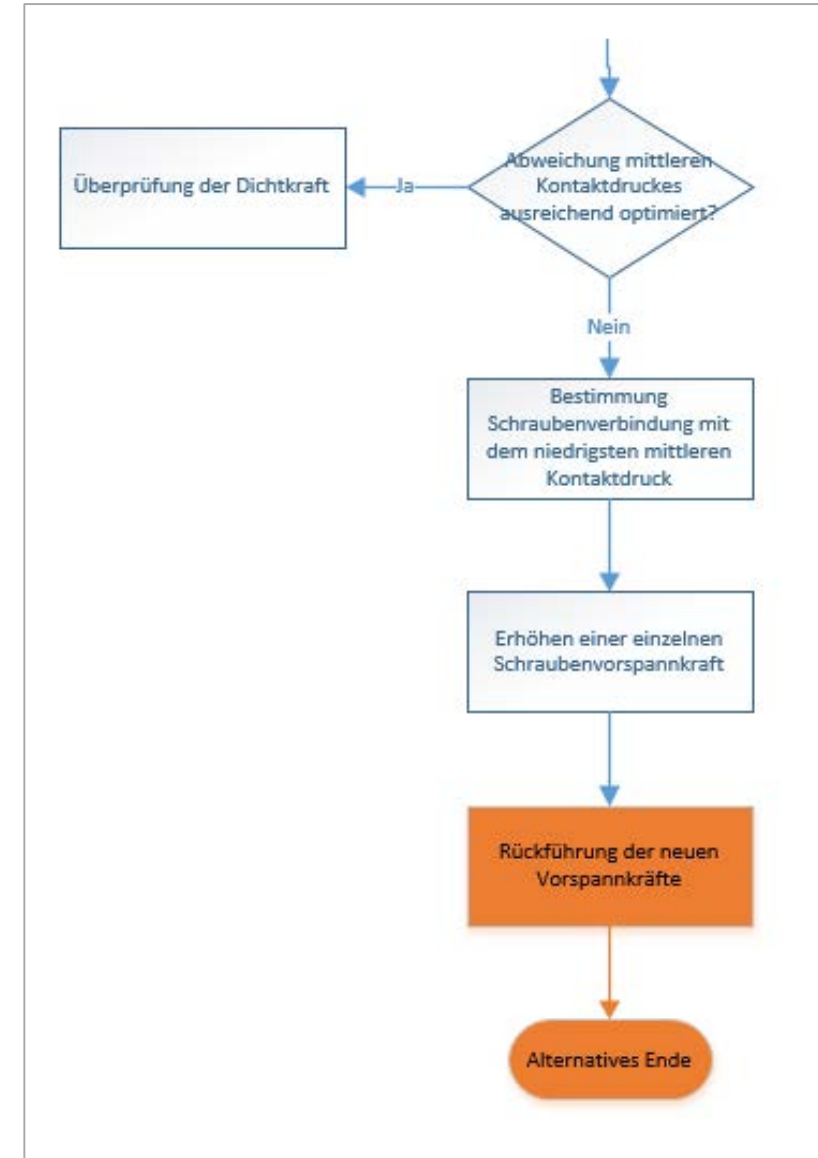
- Ausrichtung wurde optimiert
- Winkelabweichung $< 0,000005^\circ$
- Abstand $< 0,000004$ mm



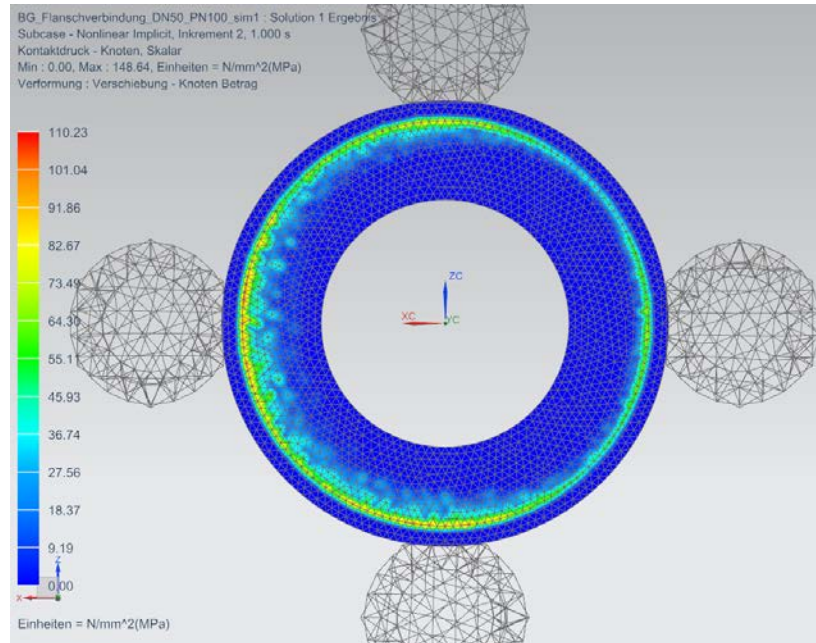
Druckverteilung wurde nicht optimiert!

Optimierung durch Druckmessungen Veränderungen im Simulationsmodel und Programmablaufplan

- Druckmessungen an den Dichtflächen
- Messpunkte werden Schraube zugeordnet
- Mittelung der Messwerte je Schraube
- Veränderung Vorspannkraftberechnung

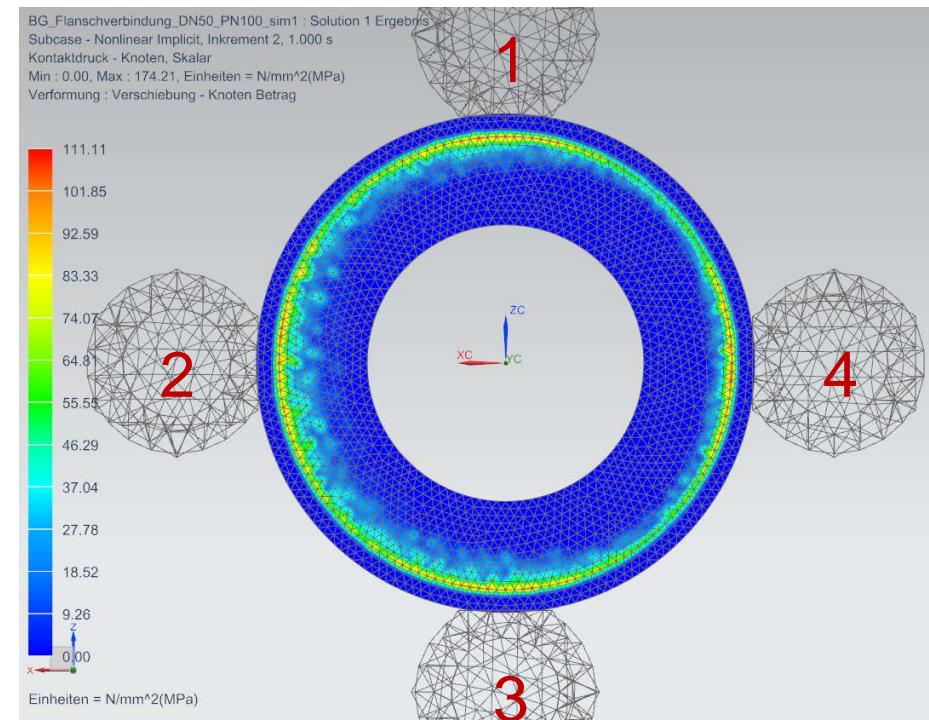


Optimierung durch Druckmessungen



- Druckverteilung wurde optimiert
- Ausrichtung wurde verschlechtert
- Winkelabweichung von $0,01^\circ$

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube 4
Vorspannkraft	23993 N	21000 N	21524 N	26149 N



► Eine gleichmäßige Druckverteilung ist wichtiger für die Funktion!

Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung und Fazit

- Der Konstrukteur konnte durch den Einsatz von PLM Methodik von Routineaufgaben entlastet werden.
 - Automatisierte und wissensbasierte Bolzenvorspannkraft
 - Wissensbasierte Optimierung der Bolzenvorspannkraft
- Mit den Achsen und der Ausrichtung von Flanschen lässt sich keine Aussage über den Dichtdruck treffen
 - Eine Optimierung der Flanschausrichtung hat somit keinen direkten Einfluss auf die Druckverteilung an der Dichtung
- Erfolg brachte eine Optimierung mittels Druckmessungen an den Dichtflächen
- Die Optimierung wird genauer je mehr Schrauben die Flanschverbindung besitzt

Ausblick

- Zusammenführung der Methoden
 - Kombination von Schraubenauslegung und Optimierung
- Ausweitung der Anwendbarkeit der Methoden
 - Bisher wurden die Ansätze nur an einem Beispiel angewendet
- Überprüfung der Optimierungsparameter
 - Durch weitere Beispielbaugruppen können diese validiert werden
- Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit unterschiedlicher Vorspannkräfte
 - Mittels praktischer Versuche oder durch Simulationsbaugruppen

André Loibl M.Sc.

andre.loibl@uni-due.de

+49 (0) 203 379 3935

Universität Duisburg-Essen

Institut für Produkt Engineering

Rechnereinsatz in der Konstruktion

www.uni-due.de/cae

Lotharstr. 1

47057 Duisburg

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Institut für Produkt Engineering